

터널 갱구사면 쏘일네일링 보강배치계획을 위한 최적화기법 연구

김병찬^{1*} · 문현구²¹정회원, 한양대학교 자원환경공학과 박사과정²비회원, 한양대학교 자원환경공학과 교수

A study on the optimization technique for the plan of slope reinforcement arrangement of soil-nailing in tunnel portal area

Byung-Chan Kim^{1*}, Hyun-Koo Moon²¹Korea, HANYANG University, Graduate student, Dept. of Natural Resources and Environmental Engineering²Korea, HANYANG University, Professor, Dept. of Natural Resources and Environmental Engineering

ABSTRACT: In order to ensure the stability of tunnel portal slope, reinforcement method such as anchors, soil nails and rock bolts have been used in Korea. When selecting slope reinforcement methods in tunnel portal area such as reinforcement arrangement and length, trial and error method can be very time-consuming and it was also not easy to verify the selection of an optimum condition. In this study, using the FISH language embedded in the finite difference code FLAC3D program, the optimization technique was developed with the Differential Evolution Algorithm (DEA). After building a database on the soil nailing method in tunnel portal area, this system can be selected to an optimum arrangement plan based on the factor of safety through the FLAC3D analysis. Through the results of numerical analysis, it was confirmed that the number of analysis was decreased by about 8 times when DEA based optimization technique was used compared to the full combination (FC). In case of the design of slope reinforcement in tunnel portal area, if this built-system is used, it is expected that the selection of an optimum arrangement plan can be relatively easier.

Keywords: Tunnel portal, Differential evolution algorithm (DEA), Optimization, Slope reinforcement, Soil nailing

초 록: 국내 터널 갱구사면에 안정성을 확보하기 위한 사면보강은 앵커, 쏘일네일 및 록볼트 등을 이용한 다양한 공법이 사용되고 있다. 갱구 사면보강공법 및 보강재 배치, 보강재 길이 등을 선정하기 위해서는 시행착오법 등 시간이 많이 소요되기도 하며, 최적 조건의 상태가 선정되었는지에 대한 검증이 쉽지 않은 경우도 발생한다. 본 연구에서는 FLAC3D 프로그램에 내장된 FISH 언어를 사용해서, 차분진화 알고리즘(DEA)을 적용한 최적화기법을 개발하였다. 갱구사면 보강공법 중에 쏘일네일링 공법에 대한 데이터베이스를 구축한 후, FLAC3D 해석을 통한 안전율 기반의 최적화배치 계획을 선정할 수 있도록 하였다. 수치해석 결과, 완전조합(FC)에 비해서 DEA 기반의 최적화기법이 해석회수가 8배 정도 감소함을 확인하였다. 갱구 사면보강 설계 시 개발된 시스템을 활용하면, 최적화배치 계획을 상대적으로 쉽게 선정할 수 있을 것으로 기대된다.

주요어: 터널 갱구부, 차분진화 알고리즘(DEA), 최적화, 사면보강, 쏘일네일링

1. 서 론

지반공학적 측면에서 터널 갱구부(Tunnel portal area)는 지반조건이 불안정하여 터널굴착이나 지표면

변화 등으로 인한 비탈면 붕괴가능성이 높으며, 편토 압으로 인한 국부적인 응력집중은 그 대책이 어려울 뿐만 아니라 막대한 비용이 소요되기도 하며, 도로이용 시 낙석과 눈사태 등 자연이상 재해의 영향을 받기 쉬운 곳이기도 하다(Lee and Lee, 2001).

갱구부의 범위는 각 터널에 따라 지형, 지질 및 노선의 위치 등 설계조건이 다르기 때문에 일률적으로 정의하기는 곤란하지만, 터널의 시 종점부에서 터

***Corresponding author:** Byung-Chan Kim
E-mail: bryan@basis.co.kr

Received November 10, 2016; **Revised** November 24, 2016;
Accepted November 28, 2016

널시공이 비탈면이나 지표면에 영향을 미칠 수 있는 범위를 갱구부라 한다. Fig. 1에서는 일반적인 터널 갱구부의 범위를 보여주고 있다. 갱구부는 일반적으로 갱문구조물 배면으로부터 터널길이 방향으로 터널 직경의 1~2배 범위 또는 터널 천장부로부터 토피고 3~5 m에서 터널직경 1.5배의 토피고가 확보되는 범위까지로 정의한다. 단, 원지반 조건이 양호한 암반층 또는 붕적층, 충적층 등의 연약토사층에서는 별도의 구간을 갱구부 범위로 정의할 수 있다(KR, 2013).

터널 갱구부는 터널 구조물 중 유일하게 외부와 연결되는 구간으로 산사태 피해를 직접적으로 받을 수 있는 구간이다(Jeong and Seo, 2013). 최근에는 도로의 선형 개량 및 고속화로 산악지역에서 터널건설이 증가하고 있어, 터널 설계 시 갱구부의 안정성을 확보하는 것이 반드시 필요하다. 갱구부는 굴착이 진행됨에 따라서 지반 안정성이 떨어지고, 비탈면 붕괴, 지표침하, 굴진면 붕괴, 편도압에 의한 지보재의 항복 등 발생할 수 있는 많은 문제가 발생할 수 있다. 그러므로 예상되는 문제점을 사전에 파악하여, 옹벽, 가압성토, 물빼기공, 그라우팅, 앵커, 쏘일네일링, 강관다단 그라우팅, FRP (Fiberglass Reinforced Plastic), 파이프루프 및 록볼트 등 다양한 방법을 적용하여야 한다. 하지만, 이러한 다양한 공법의 선정을 포함한, 보강재 배치(개수 및 간격), 길이, 크기 등의 최적화 문제를 내포하고 있다.

본 연구에서는 갱구부 중에서 갱구사면의 보강공법 선정에 대한 최적화 기법을 구축하기 위해서, 갱구사

면 보강공법 중 일반적으로 많이 사용되고 있는 쏘일 네일링 공법을 대상으로 하였고, 최적화 기법 중에 하나인 차분진화 알고리즘(DEA)을 사용하였다. 알고리즘 구축은 FLAC3D 프로그램(Itasca, 2012)에 내장된 FISH 언어를 사용하였고, 구축된 알고리즘을 통해서 FLAC3D 수치해석을 수행하여 갱구부의 안정성 확보 및 최적공사비를 만족하는 쏘일네일링 공법의 최적배치계획을 선정하도록 하였다.

많은 연구자들에 의해 갱구사면 보강방법에 대한 연구가 진행되었다. 최근에는 갱구부 보강사면 안정 해석 및 산사태 위험도 분석(Jeong and Seo, 2013), 갱구부 사면보강을 통한 안전한 시공 및 유지관리(Lee et al., 2014) 그리고 갱구부 대절토 보강사면에 대한 연구(Park and Bae, 2015) 등의 연구가 보고되었다. 또한, 건설 분야에 관련된 최적화 기법 연구도 많은 연구자들에 의해서 진행되었다. Ahn (2012)는 보강토 옹벽에 대한 최적설계 방안을 수치해석을 통해서 연구를 수행하였다. Hwang (2013)은 NATM터널 갱구부의 효율적 보강방안에 대한 연구를 수치해석을 사용하여 수행하였다. 하지만, 이러한 연구는 다양한 지반조건 등의 설계상황에 따라 설계자의 반복적인 시행착오법이 수행되어야 하므로 최적화하기에는 무리가 있을 것으로 판단된다. Kim et al. (2003)은 인공 신경망(Artificial Neural Network)을 이용해서 흙막이 공법 선정 모델을 개발하는 등 흙막이벽체에 관한 지보공법을 최적화하는 연구를 수행하였다.

최적화 문제 중 목적함수가 연속적이지 않고 변수가 많은 경우, 유전자 알고리즘(Genetic algorithm, GA)이 일반적으로 사용된다. 하지만, 유전자 알고리즘은 변수가 많아지면 개체수가 늘어남에 따라 돌연변이(Mutation), 교배(Crossover), 선택(Selection) 등에 대한 해석시간이 증가된다. 이러한 GA의 한계를 개선하기 위한 많은 개량된 GA방법들이 존재한다. 그러한 이유로 본 연구에서는 수렴방향을 유도하는 과정이 단순하고, 수렴속도가 대폭 감소될 수 있는 DEA (Storn and Price, 1997)를 사용하여 최적화 알고

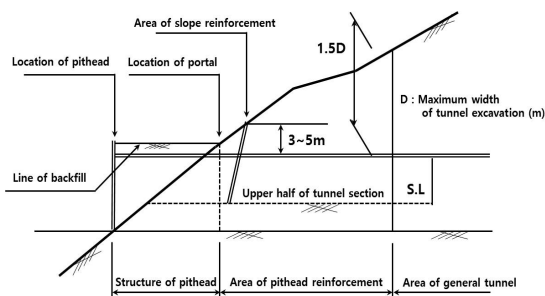


Fig. 1. The range of standard tunnel portal area

리즘을 구축하였다.

많은 연구자들이 차분진화 알고리즘을 사용하여 건설 분야에 적용하려는 시도를 하고 있다. An et al. (2016a, 2016b)은 운영 중 터널의 안정성 평가에 다양한 계측정보를 사용해서 역해석을 수행할 수 있도록, 차분진화 알고리즘(DEA)을 구축하는 연구를 FLAC3D 프로그램을 사용하여 수행하였다. Vardakos et al. (2012)은 차분진화 알고리즘과 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)을 조합하여 터널 주변 지반의 물성치를 산정하기 위한 역해석 알고리즘을 구축하였다. 또한, FLAC2D 프로그램에 내장된 FISH언어를 사용하여 구축된 알고리즘을 검증하였다. Su et al. (2008)은 차분진화 알고리즘(Differential Evolution Algorithm)을 사용해서 터널 역해석 알고리즘을 구축하였고, FLAC 3D 프로그램에 내장된 FISH언어를 사용하여 구축된 알고리즘을 검증하였다.

또한, 많은 연구자들에 의해서 쏘일네일링 공법의 최적화 연구가 진행되었다. Zheng et al. (2012)는 계층적 유전자 알고리즘(HGA)을 사용하여 쏘일네일링의 최적화 모델을 제안하였다. 이 모델을 통해서 쏘일네일링 브레이싱의 최적 간격을 탐색할 수 있어서 경제적 효과가 있는 것으로 보고하였다. Imam and Hoseini (2016)는 쏘일네일-앵커로 구성된 복합보강재의 거동에 대해서 분석한 후, 요구되는 최소안전율에 대한 최적 보강재 길이를 도표화하는 연구를 수행하였다. 비용이 최소화되는 쏘일네일-앵커의 조합을 최적화할 수 있는 도표를 제안하였다.

그러므로 본 연구에서는 갱구사면의 안정성을 확보하면서, 보강비용 측면에서도 경제성을 확보할 수 있도록 갱구사면 보강공법 중 쏘일네일링 공법에 대해서 보강배치계획에 대한 최적화 시스템을 차분진화 알고리즘(DEA)으로 구축하고, FLAC3D 프로그램을 사용한 수치해석을 통해서, 그 적용성을 확인하고자 한다.

2. 갱구 사면보강공법

터널 갱구사면에 대한 보강공법은 활동력을 감소시키는 공법과 저항력을 증대시키는 공법이 있다(Park and Bae, 2015). 활동력을 감소시키는 공법으로는 압성토, 사면 경사 완화, 활동토체 일부 제거 등이 있고, 저항력을 증가시키는 공법으로는 쏘일네일링, 록볼트, 역지말뚝, 지중앵커공법, 옹벽공법 등이 있다.

본 연구에서는 저항력을 증가시키는 공법 중에 일반적으로 갱구사면보강에 많이 사용되고 있는 쏘일네일링공법에 대해서 최적화 기법을 적용하였다.

쏘일네일링 공법에 의한 사면보강의 원리는 보강토체가 전단의 영향을 받을 때, Soil Nail에 발휘되는 인장력, 전단력, 휨모멘트에 대한 연구로 설명할 수 있다. 실험적 연구(Marchal, 1984)와 탄-소성론을 이용한 이론적 연구(Schlosser, 1982; Blondeau et al., 1984) 등에서 다음과 같은 결과를 제시하고 있다.

Soil Nail 토체가 전단의 영향을 받게 되면, 네일은 파괴면과의 교점에서 인장-전단 파괴가 일어날 수 있으며, 또는 파괴면 바깥쪽에 위치한 최대모멘트 위치에서 발생하는 소성화(plastification)로 인해 파괴가 일어날 수 있다. 네일이 연성(mild or semihard steel)을 갖고 있는 경우에, 최대 휨모멘트 지점에서 발생하는 소성화가 쏘일네일의 파괴를 일으키지 않는다. 이러한 경우 소성화는 Fig. 2와 같은 2개의 소성한지에서 제한되며, 소성화가 억제되는 변형단계에서는 수평변위가 지반의 수평저항력에 의해 억제된다. 2개의 소성한지의 역할은 Nail에 작용하는 최대 축력이 R_n 값을 상회하지 않도록 제어하는 역할을 한다. 이러한 메커니즘이 발휘되는 동안 최대전단력이 발생하는 지점에서 인장-전단으로 인한 파괴가 일어날 수 있다. Fig. 2에서는 네일과 그 상호작용에 대한 내용을 보여주고 있으며, 이러한 상호작용(interaction)은 네일의 휨모멘트가 '0'이 되는 점, 다시 말하면 가상파괴면과 네일과의 교차점(T_n , T_c 평면)에서 발생한다. Fig. 2에서 T_n 은 네일에 작용되는 축력, T_c 는 네일에 작용되는

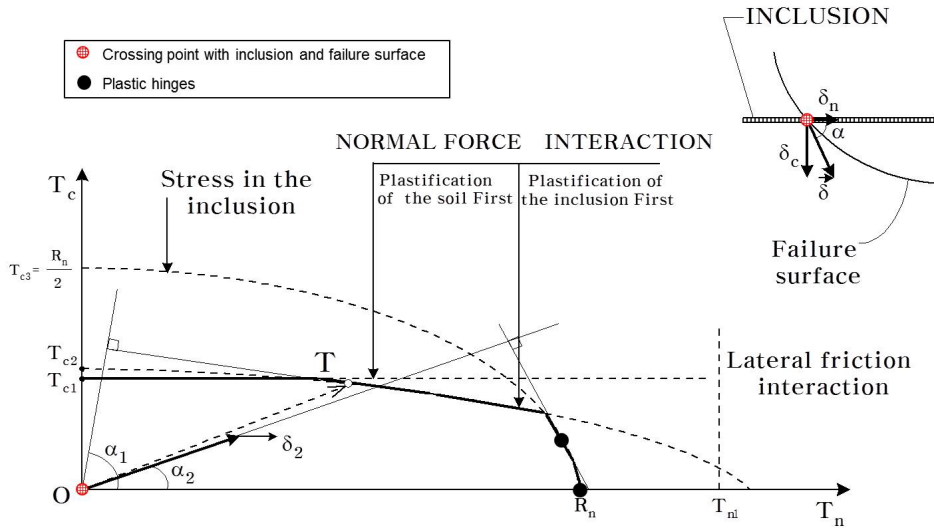


Fig. 2. The Mechanism of normal and shear force on two dimensional space (Schlosser, 1982)

전단력, T 는 파괴 시 발휘되는 네일의 보강력, δ_n 은 네일 방향으로 발생하는 변위, δ_c 는 네일의 직교 방향으로 발생하는 변위, R_n 은 네일의 인장저항력을 의미한다.

3. 최적화 기법 - DEA

각각의 변화 대상 벡터 $X_G = [x_{1,G}, x_{2,G}, \dots, x_{NP,G}]$ 에 대해 집단에서 랜덤하게 선택된 서로 다른 3개의 벡터로부터 교배용 벡터를 식 (1)과 같이 생성한다. 여기서, NP는 집단의 크기이고, F는 돌연변이 상수로 0~2 사이의 값을 갖는다. 식 (2)는 교배단계에 대한 내용이다. 부모 벡터(parent vector)는 시행 벡터(trial vector)를 생성하기 위하여 돌연변이 벡터(mutant vector)와 교배된다. 여기서 rand는 변화에 사용될 벡터가 랜덤하게 선택됨을 의미하며, CR은 교배 상수로 0~1 사이의 값을 갖는다. Irand는 [1, 2, ..., D]의 무작위 정수(integer)이다.

$$v_{i,G+1} = x_{r1,G} + F \cdot (x_{r2,G} - x_{r3,G}) \quad (1)$$

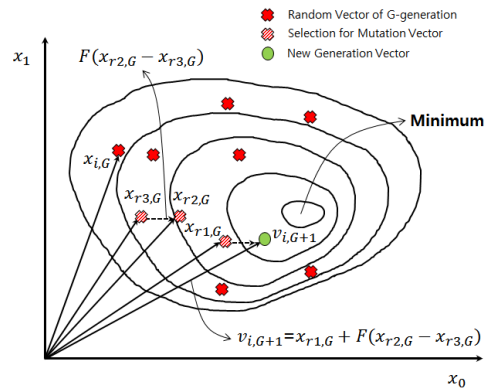


Fig. 3. The procedure of differential evolution algorithm in 2D space (Storn and Price, 1997)

$$v_{ji,G+1} = \begin{cases} v_{ji,G+1} & \text{if } rand_j \leq CR \text{ or } j = I_{rand} \\ v_{ji,G} & \text{if } rand_j > CR \text{ or } j \neq I_{rand} \end{cases} \quad (2)$$

$$x_{i,G+1} = \begin{cases} u_{i,G+1} & \text{if } f(u_{i,G+1}) \leq f(x_{i,G}) \\ x_{i,G} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

식 (3)은 선택 단계에 대한 내용이다. 목표 벡터(target vector) $x_{i,G+1}$ 는 시행 벡터 $u_{i,G+1}$ 와 비교된다. 그리고 다음 세대에는 우수한 형질의 개체가 선택된다. 그러므로 각각의 시행 벡터는 부모 벡터와의 비교

를 통해 다음 세대에는 우수한 유전 형질을 전달하게 된다. 이러한 과정을 거쳐 모집단에서 최고 우수한 개체들은 다음 세대에도 유지된다. 지정된 종료 기준에 도달할 때까지 이러한 과정이 반복 수행된다. Fig. 3에서는 2차원 평면에서 돌연변이 벡터 생성 식 (1)의 과정을 보여주고 있다.

4. 최적화 기법에 의한 수치해석

쏘일네일링 공법의 실제 거동은 복잡한 형태를 띠고 있다. 일반적으로 쏘일네일링 공법의 설계에서는 인발에 의한 파괴와 전단에 의한 파괴를 고려한다. 쏘일네일링의 파괴거동은 인발파괴와 전단파괴와 같이 파괴면을 가지면서 사면이 무너지는 경우도 발생하지만, 굴착에 의해서 사면 표면의 수평응력이 감소함에 따라 점진적으로 얇은 활동에 의해서 파괴에 이르는 경우가 실제 현장에서 자주 발생하게 된다. 쏘일네일링의 파괴거동을 크게 인발파괴, 전단파괴, 얇은파괴로 정의할 수 있다(Seo et al., 2012). 쏘일네일의 파괴 거동을 고려한 보강력 산정을 하지 못하는 한계를 내포하고 있지만, 본 연구의 목적은 쏘일네일링 공법의 최적배치에 대한 내용을 다루는 것이기 때문에, 갱구사면의 안정성을 확보하면서, 최소 네일(Nail) 개수를 만족하는 조건으로 단순화해서 최적화 알고리즘에 대한 적용성을 파악하였다. 또한, 안정성 평가를 위해서는 FLAC3D 프로그램을 사용하여, 전단강도감소기법(Shear Strength Reduction Method, SSRM)을 적용한 안전율을 비교하여 수행하였다.

4.1 수치해석(FC, GA, DEA)

Table 1에서는 해석 케이스의 조합을 보여주고 있다. 갱구사면에 설치할 네일의 배치조건은 간격, 개수, 길이, 각도를 조합해서 반복해석을 수행하였다. 첫 번째로 설치 조건별로 모든 경우의 수를 완전 조합(Full Combination, FC)하여 모든 케이스에 대해서

Table 1. The design conditions for soil nail arrangement

Items		Conditions		
		Initial	Increased design	Added construction cost
Numbers Vertical		5, 6, 7, 8		
Spacing (m)	Horizontal	1.2, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0		
	Vertical	1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5		
Length (m)		8, 10, 12, 14, 16		
Angle (°)		30	20, 25, 30, 35, 40	

Table 2. The results of optimization analysis (FC, GA, DEA)

Methods	Optimal Minimum		Numbers of Analysis
FC	Numbers	5	500
	Horizontal (m)	2.0	
	Vertical (m)	2.0	
	Length (m)	14.0	
	Angle (°)	30	
GA	Numbers	5	240
	Horizontal (m)	2.0	
	Vertical (m)	2.0	
	Length (m)	14.0	
	Angle (°)	30	
DEA	Numbers	5	160
	Horizontal (m)	2.0	
	Vertical (m)	2.0	
	Length (m)	14.0	
	Angle (°)	30	

해석을 수행하였다. 또한 최적화 알고리즘의 비교를 위해서 유전자알고리즘(GA) 및 차분진화 알고리즘(DEA)을 이용하여 최적의 설치조건을 탐색하였다. 배치간격은 가로 1.2~3.0 m, 세로 1.5~3.5 m, 설치개수는 세로 5~8개, 길이는 8~16 m, 각도는 30° 경우로 조합하여 각각 해석을 수행하였다. GA 및 DEA 중에서 더 우수한 방법을 선택하기 위한 초기 케이스로서 조건 감소를 위해서 설치각도에 대해서는 30°로 고정하여 해석을 수행하였다. 이 방법은 모든 경우의 수를 탐색할 수 있는 장점이 있지만, 해석조건이 수가 늘어나고, 각 조건마다 경우의 수가 늘어날수록, 해석에 소요되는 시간이 기하급수적으로 늘어나는 단점이

있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해, GA 및 DEA를 이용하여 최적해(Optimal Minimum, OM)를 탐색하고, 그 결과를 비교하였다. 완전 조합 방법은 500번의 수치해석을 수행하여 OM을 찾았고, GA를 이용한 경우 240번의 조합 후 OM을 찾을 수 있었다. 또한, DEA의 경우에는 160번의 해석을 통해 OM을 찾을 수 있었다. 완전 조합 500번 중 안전율 1.5 이상을 만족하는 최소 네일 개수 240개의 결과를 얻을 수 있었다. 같은 개수인 경우, 안전율이 더 높은 경우의 수를 OM으로 선택하였다. Table 2에 해석 결과를 정리하였다.

해석에 사용된 사면 형상은 강남순환 민자고속도로 제5공구 관악터널 시점부 갱구사면(Doosan, 2008) 중 남측비탈면을 참고로 설정하였고, 해석에 사용된 지반 및 DEA 물성치는 Table 3에서 보여주고 있다. 해석 대상 지층 3가지에 대해서 모두 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였고, 전단강도감소기법을 적용하여 안전율을 산정하였다. 풍화토층(Weathered Soil)에 대한 변형계수(E)는 29 MPa, 단위중량(γ_t)은 19 kN/m³, 포아송비(ν)는 0.35, 점착력(c)은 16 kPa 그리고 내부마찰각(ϕ)는 30°를 적용하였다. 풍화암층(Weathered Rock)에 대한 단위중량(γ_t)은 21 kN/m³, 변형계수(E)는 250 MPa, 포아송비(ν)는 0.32, 점착력(c)은 20 kPa 그리고 내부마찰각(ϕ)는 31°를 적용하였다. 파쇄대(Crushed Rock)에 대한 변형계수(E)는 400 MPa, 단위중량(γ_t)은 23 kN/m³, 포아송비(ν)는 0.30, 점착

력(c)은 30 kPa 그리고 내부마찰각(ϕ)는 28°를 적용하였다. 또한, 가상 보강사면을 이상화하여 $K_0 = 0.5$ 를 Fig. 4에 제시된 모델에 작용하는 것으로 간주하였다.

차분진화 알고리즘에 적용된 파라미터는 초기 무작위 개체군 수는 10, 돌연변이 상수는 0.8, 교배상수는 0.8, 최대 진화 반복횟수는 100을 적용하였다.

Table 4에서는 수치해석에 사용된 네일의 물성치를 보여주고 있다. Cable 요소를 사용하였으며, 네일 자체의 강도를 표현하는 구조 관련 물성치와 네일과 원지반 사이에 그라우팅된 영역에 대한 물성치로 구분해서 입력하였다.

FLAC3D에 내장된 해석 기법 중 전단강도감소기법을 이용하여 사면안정해석을 수행하였다. 탐색조건은 안전율 1.5이상이고, 최소 네일 개수를 만족하는

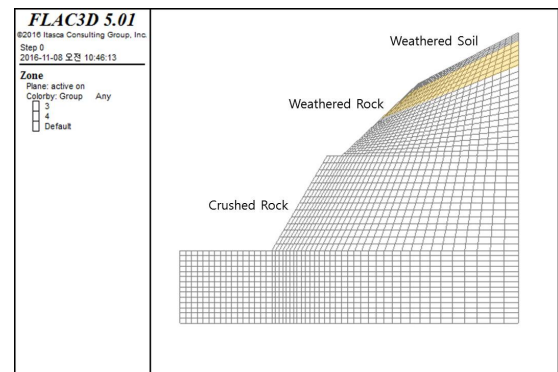


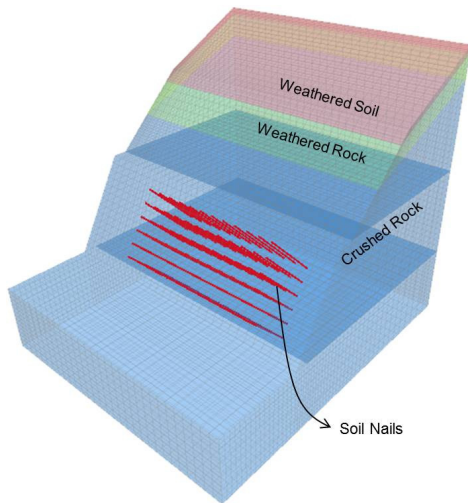
Fig. 4. The feature of representative section for soil layers modeling in FLAC3D

Table 3. Soil and DEA parameters used in the feasibility numerical analysis (DEA based SSRM)

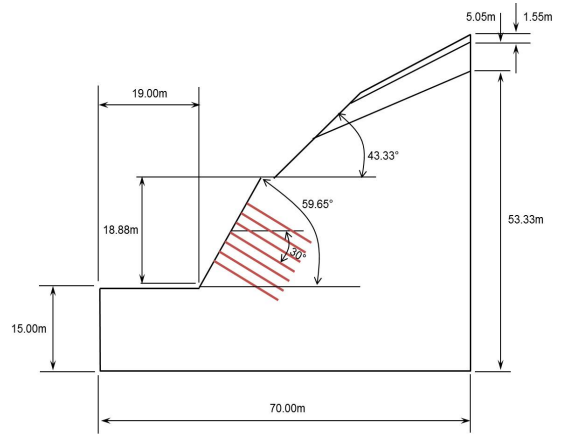
	Weathered Soil	Weathered Rock	Crushed Rock	DEA	
E (Elastic Modulus)	29 MPa	250 MPa	400 MPa	Range of Target Values	Condition of Soil Nailing Arrangement Please refer Table 1
γ_t (Unit Weight)	19 kN/m ³	21 kN/m ³	23 kN/m ³		
c (Cohesion)	16 kPa	20 kPa	30 kPa		
ϕ (Friction Angle)	30°	31°	28°		
ν (Poisson's ratio)	0.35	0.32	0.30	F (Mutant Constant)	0.8 (0~2)
K (Bulk Modulus)	$E / 3 \cdot (1 - 2 \nu)$			CR (Crossover Constant)	0.8 (0~1)
G (Shear Modulus)	$E / 2 \cdot (1 + \nu)$			NP (Number of population)	50
Model/Analysis type	Mohr-Coulomb/SSRM			Itermax (Max. Iteration)	100

Table 4. Model parameters for soil nails (HKIE, 2011)

Type of parameters	Parameters	Input values
Structural parameters	Area, A (m^2)	7.85×10^{-3}
	Perimeter, P ($m^2/m/m$)	0.209
	Young's modulus, E (kPa/m)	8.33×10^6
	Tensile yield strength, Y_t (kN/m)	1×10^7
	Compressive yield strength, Y_c (kN/m)	1×10^7
Shear coupling spring	Stiffness, K_s (kPa/m)	20,138
	Cohesive strength, C_s ($kN/m/m$)	1.047
	Friction coefficient, ϕ_s ($^\circ$)	35


Fig. 5. The feature of 3-Dimensional modeling

해석조건을 찾도록 하였다. Fig. 4에서는 지층 구성에 대한 대표 단면을 보여주고 있고, Fig. 5에서는 FLAC 3D 모델링 형상을 보여주고 있다. Fig. 6에서는 네일 배치, 설치각도 및 사면 각도 등을 보여주고 있다. 네일은 경사면 중심점을 기준으로 가로 방향, 세로 방향으로 네일 개수를 8~12개, 5~8개로 변경하면서 직사각형 형태로 배치하였다. 네일의 설치 경사각은 해석모델에서는 동일하게 설정하였으며, 30° 로 선정하였다.


Fig. 6. The feature of representative section

$$FS_{OptimalMinimum} = \begin{cases} FS > 1.5 & \text{and,} \\ N_{Nail, i+1} < N_{Nail, i} \end{cases} \quad (4)$$

최적해(OM)에 대한 탐색은 식 (4)에서 표현한 것과 같이, 1.5 이상의 안전율을 보이고, 네일의 개수가 최소인 조건을 찾는 것으로 하였다.

Fig. 7에서는 쏘일네일링 최적 배치를 위한 차분진화 알고리즘의 순서도를 보여주고 있다. 차분진화알고리즘에 의해 생성된 설계변수 개체값(네일의 종, 횡방향 간격, 길이, 각도)를 기반으로 FLAC3D에서 네일을 배치하도록 FISH 함수를 구성하였다. 첫 번째 단계로 네일 보강을 실시하기 전에 원지반에 대한 안전율을 계산하였다. 보강 전 안전율은 허용 안전율 1.5에 미치지 못하는 1.3으로 계산되었다. 이후, 해당 세대의 개체값들로 구성된 보강사면 단면을 전단강도 감소기법으로 해석하여 사면 안전율을 구하고, 허용 안전율 1.5 이상이 되는 조건을 탐색하도록 하였다. 사면 안전율이 계산된 개체 값들로 차분진화알고리즘에 의해 다음 세대를 구성한 후, 다시 반복적으로 네일을 배치해서 사면안정해석을 수행하도록 구성하였다. 허용안전율에 가까운 네일배치가 구해지거나, 설정한 한계세대수를 초과하면 반복 계산을 종료하도록 하였다.

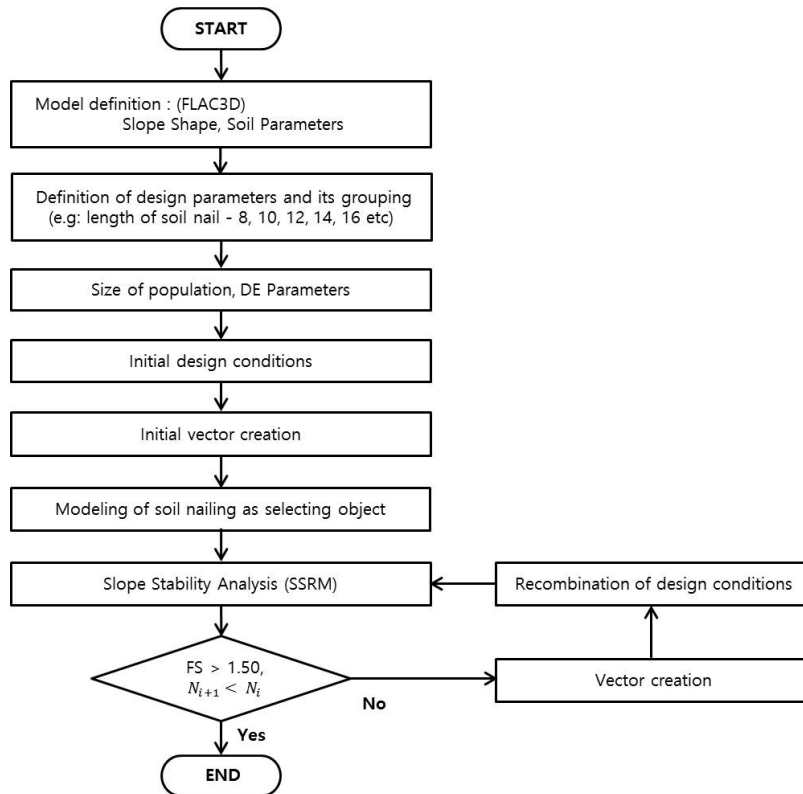


Fig. 7. Flowchart of optimization analysis for initial input parameters

4.2 수치 해석(FC, DEA: 설계조건 증가)

4.1장에 기술한 바와 같이, DEA가 GA에 비해 상대적으로 빠르게 최적해(OM)를 찾는다고 판단되는 결과를 확인할 수 있다. 그러므로 4.2장에서는 설계조건을 추가하여 해석을 수행하였고, FC 및 DEA에 대해서만 OM을 탐색하였다. 수치해석에 사용된 사면형상과 사면 물성치는 4.1장 해석에서 사용된 것과 동일하고, 설계조건을 추가하였다. 설계조건의 전체 조합수는 2500이고, 차분진화 탐색을 통해 320번 만에 OM을 찾을 수 있었다. 차분진화 알고리즘은 실수 탐색이 가능한 알고리즘이지만, 설계조건을 그룹화하여 발생된 실수조건을 바탕으로 구간별 그룹화된 설계조건에서 선택하는 방식으로 최적화 과정을 진행시켰다. 설계 길이의 경우 8, 10, 12, 14 m으로 4가지의 설계조건

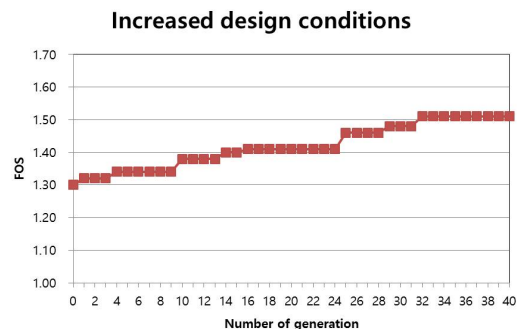


Fig. 8. The results of increased design conditions

을 가정하였고, 실수 조건의 난수를 발생구간을 4구간으로 나누어 각 구간에 해당하는 설계길이를 선택하도록 하였다. 세대별 사면 안전율 변화 과정은 Fig. 8과 같다. 설계변수가 많아 급격하게 수렴이 이루어지기 보다는 정체구간을 거치다가 허용 안전율로 근접

해가는 것을 확인할 수 있었다. 해석 조건은 Table 1에 해석 결과는 Table 5에 정리하였다.

4.3 수치 해석(FC, DEA: 시공단가 고려)

네일은 직경과 길이에 따라 시공비용이 달라지므로, 단순히 네일 개수로 탐색한 최적해(OM)가 최소 공사비를 최적화한 결과로 판단하기에는 무리가 따른다. 실제 공사비용을 고려하기 위해서는 네일의 직경, 네일의 설치각도, 설치 높이, 시공 장비 등을 고려해야 하지만, 본 연구에서는 네일 직경과 길이, 설치 각도에

Table 5. The results of optimization analysis (FC, DEA): increased design and added construction cost conditions

Methods	Items	Optimal Minimum		Numbers of Analysis	
		Increased design (i.d.)	Added construction cost (a.c.c.)	i.d.	a.c.c.
FC	Numbers	5	6	2500	2500
	Horizontal (m)	1.5	1.5		
	Vertical (m)	2.0	2.0		
	Length (m)	16.0	14.0		
	Angle (°)	35	35		
DEA	Numbers	5	6	320	390
	Horizontal (m)	1.5	1.5		
	Vertical (m)	2.0	2.0		
	Length (m)	16.0	14.0		
	Angle (°)	35	35		

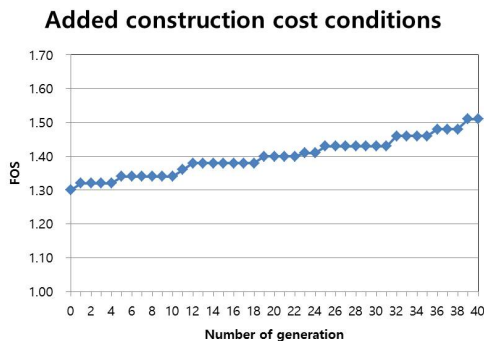


Fig. 9. The results of added cost conditions

다른 비용을 고려하는 것으로 단순화시켜 사면 안정성을 확보하고 최소 비용이 소요되는 네일 보강 배치를 탐색하였다. 네일 시공단가는 2014년 하반기 표준 품셈 및 기타기준에 따른 산출근거 내용이 수록된 EBS 프로그램(Glotech, 2013)으로 작성된 데이터를 Excel 파일로 변환한 문서를 참고하여 산출하였다.

4.3장에서는 시공단가를 고려하여 해석을 수행하였고, FC 및 DEA에 대해서만 OM을 탐색하였다. 수치해석에 사용된 사면형상과 사면 물성치는 4.2장 해석에서 사용된 것과 동일하고, 시공단가를 추가하였다. 차분진화 알고리즘의 수렴율을 결정하는 적합도(fitness, f) 공식을 허용 안전율이 1.5이상인 조건에 비용을 추가하여 계산하였다.

$$f = (FS - 1.5) \times cost (FS > 1.5) \quad (5)$$

설계조건의 전체 조합수는 2500이고, 차분진화 탐색을 통해 390번 만에 OM을 찾을 수 있었다.

시공단가를 고려한 세대별 사면 안전율 변화 과정은 Fig. 9와 같다. 4.2장의 해석결과와 유사하게 정체 구간을 거치다가 허용 안전율로 근접해가는 것을 확인할 수 있었다. 해석 조건은 Table 1에 해석 결과는 Table 5에 정리하였다.

5. 결 론

본 연구에서 갱구사면의 안정성을 확보하면서, 보강비용 측면에서도 경제성을 확보할 수 있도록 갱구사면 보강공법 중 쏘일네일링 공법에 대해서 보강배치계획에 대한 최적화 시스템을 차분진화 알고리즘(DEA)으로 구축하고, FLAC3D 프로그램을 사용한 수치해석을 통해서, 그 적용성을 확인한 결론은 다음과 같다.

1. 최적해 문제는 탐색변수의 증가 및 탐색조건이 다양화 될수록, 탐색회수가 증가하는 문제를 내포하고 있다. 본 연구에서 적용한 차분진화 알고리즘

(DEA)을 통해서 설계변수의 개수가 많고, 변수 간 상관관계가 없는 경우에도 상대적으로 빠르게 최적해를 찾을 수 있음을 확인하였다. 설치 조건별 단순조합을 고려한 케이스에 비해서 해석회수를 3배 단축하였고, 유전자 알고리즘(GA)에 비해서도 1.5배 정도 빠른 탐색 결과를 보였다.

2. 설계조건을 늘린 경우에도, 단순조합 케이스에 비해 해석회수를 약 8배 정도 단축할 수 있었다. 설계변수가 늘어나고, 조건이 복잡해질수록 단순조합에 비해 차분진화 알고리즘을 이용한 탐색이 효과적인 것으로 확인되었다.
3. 시공비를 고려해서 최적해를 선정할 수 있도록 비교조건에 시공비 항목을 추가하여 해석한 결과, 네일의 직경과 길이만을 고려한 한계점은 있지만, 시공비를 고려하지 않은 경우에 비해 보다 합리적인 설계조건을 찾을 수 있었다.

본 연구는 갱구사면 보강에 대한 최적화 문제를 다루기 위한 초기 연구로서, 터널 갱구사면 보강방법의 최적설계를 목표로 차분진화 알고리즘을 이용하여 최적화 기능을 개발하였다. 하지만, 다양한 갱구사면 보강방법 중 네일에 대해서만 최적화 해석을 수행하였고, 시공비를 계산하기 위해서 네일의 개수, 직경만을 고려하였다. 또한, 실제 쓰일네일링의 파괴 거동을 고려하지 못하는 등 여러 가지 한계점을 가지고 있다.

향후 연구에서 앵커, 네일 등 실제 갱구사면에서 사용되는 있는 보강공법의 거동을 고려한 최적보강방법을 찾을 수 있도록 알고리즘을 개선할 계획이다. 또한 시공비도 네일의 시공위치, 장비 등 보다 다양한 시공 요소를 고려해 현실적인 시공비를 기준으로 최적해를 탐색하도록 알고리즘을 개선할 계획이다.

References

1. Ahn, W.J. (2012), "A numerical study for the optimal design reinforced retaining wall", Master's thesis, Changwon National University.
2. An, J.S., Kim, B.C., Moon, H.K., Song, K.I., Su, G.S. (2016a), "DEA optimization for operating tunnel back analysis", Journal of Korean Tunn Undergr Sp Assoc, Vol. 18, No. 2, pp. 183-193.
3. An, J.S., Kim, B.C., Moon, H.K., Song, K.I. (2016b), "Estimation of subsea tunnel stability considering ground and lining stiffness degradation measurements", Journal of Korean Tunn Undergr Sp Assoc, Vol. 18, No. 5, pp. 183-193.
4. Blondeau, F., Christiansen, M., Guilloux, A., Schlosser, F. (1984). "Talren: méthode de calcul des ouvrages en terre renforcée : Talren: Design method of reinforced soil structures", Proc. Int. Conference. In Situ Soil and Rock Reinforcement, Paris, pp. 219-224.
5. Doosan E&C. (2008), Gangnam Beltway Report of 5 building construction area.
6. Glotech Co., Ltd. (2013), EBS-v8.0 User Manual.
7. HKIE. (2011), "Design of soil nails for upgrading loose fill slopes", Report, Geotechnical Engineering Office and Hong Kong Institution of Engineers (Geotechnical Division).
8. Hwang, I.Y. (2013), "A study on effective reinforcement in portal of NATM tunnel in weathered soil", Master's thesis, Kangwon National University.
9. Imam, R., Hoseini, S.S. (2016). "Design and optimization procedure for composite soil nail-anchor walls", Japanese Geotechnical Society Special Publication, Vol. 2, No. 45, pp. 1597-1601.
10. Itasca Consulting Group, Inc. (2012), FLAC3D-Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions. Version 5.0. User Manual, Minnesota, USA.
11. Jeong, H.G., Seo, Y.S. (2013), "Slope stability analysis and landslide hazard assessment in tunnel portal area", Journal of Korean Tunn Undergr Sp Assoc, Vol. 15, No. 4, pp. 387-400.
12. Kim, J.Y., Seo, J.W., Kang, K.I. (2003). "A study on the selection model of retaining wall bearing methods using neural network", Journal of the Architectural of Korea Structure & Construction, Vol. 19, No. 5, pp. 121-128.
13. KR. (2013), "KR Code 2012 - Tunnel Portal Area (C-1208)", Korean Rail Network Authority (in Korean).

14. Lee, D.H., Lee, S.K. (2001), "Tunnel (7) - technical article", Korean Geotech Soc, Vol. 17, No. 7, pp. 14-24 (in Korean).
15. Lee, W.K., Park, J.Y., Sim, J.S. (2014), "Management of safety construction through slope reinforcement in tunnel portal area", Geoenvironmental Engineering, Vol. 15, No. 4, pp. 23-32 (in Korean).
16. Marchal, J. (1984). "Renforcement des sols par clouage. - Etude expérimentale en laboratoire : Reinforcement of soils by mailing - experimental study in the laboratory", Proc. Int. Conference. In Situ Soil and Rock Reinforcement, Paris, pp. 275-278.
17. Park, D.S., Bae, J.S. (2015), "Case study of the stability of a large cut-slope at a tunnel portal", The Journal of Engineering Geology, Vol. 25, No. 1, pp. 115-129.
18. Seo, H.J., Lee, G.H., Park, J.J., Lee, I.M. (2012). "Optimization of soil-nailing designs considering three failure modes", Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 28, No. 7, pp. 5-16.
19. Storn, R., Price, K. (1997), "Differential evolution-a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces", Journal of Global Optimization, Vol. 11, No. 4, pp. 341-359.
20. Su, G.S., Zhang, X.F., Chen, G.Q., Fu, X.Y. (2008), "Identification of structure and parameters of rheological constitutive model for rocks using differential evolution algorithm", Journal of Central South University of Technology, Vol. 15, Issue 1, pp. 25-28.
21. Vardakos, S., Gutierrez, M., Xia, C. (2012), "Parameter identification in numerical modeling of tunneling using the Differential Evolution Genetic Algorithm (DEGA)", Tunnelling and underground space technology, Vol. 28, pp. 109-123.
22. Schlosser, F. (1982), "Behaviour and design of soil nailing", In International Symposium on Recent Development in Ground Improvement Techniques, pp. 399-413.
23. Zheng, S.S., Li, Z.Q., Tao, Q.L., Han, P.C. (2012). "Hierarchical genetic algorithm for soil-nail bracing", In Applied Mechanics and Materials Vol. 170, pp. 651-654. Trans Tech Publications.